

宽窄行开沟灌溉模式提高玉米产量的研究

王京辉, 李佳乐, 李婕超, 孙思琪, 韩升才*

(内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 呼和浩特 010020)

摘要:【目的】探究宽窄行开沟灌溉模式对玉米增产的作用, 为玉米高产栽培模式提供科学依据。【方法】试验在内蒙古农业大学农场开展, 以青贮玉米文玉3号为供试材料, 采用宽窄行种植, 设置开沟灌水模式(KG)、开沟地上滴灌模式(GD)、平地滴灌模式(PD), 研究不同灌溉模式对土壤温度、玉米根系生长、光合作用能力和产量的影响。【结果】开沟灌水模式(KG)玉米根干重较平地滴灌模式(PD)增加31.25%。开沟灌水模式(KG)拔节期玉米光合能力比开沟地上滴灌模式(GD)与平地滴灌模式(PD)分别提高9.59%与12.87%。开沟灌水模式(KG)获得最高产量, 较开沟地上滴灌模式(GD)与平地滴灌模式(PD)产量分别提高11.07%与27.42%。【结论】在等量灌溉条件下, 开沟灌水模式(KG)通过影响土壤温度而提高根干重, 从而间接提高叶片光合能力, 提高玉米产量。采用开沟灌溉技术是一种可持续的种植策略, 可实现玉米增产。

关键词: 玉米; 灌溉模式; 增产; 宽窄行

中图分类号: S513.048

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)02-0016-08

Enhancing Maize Yield through Furrow Irrigation in Wide-narrow Rows

WANG Jing-hui, LI Jia-le, LI Jie-chao, SUN Si-qi, HAN Sheng-cai*

(College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010020, China)

Abstract: Objective: This study investigated the impact of furrow irrigation in wide-narrow row planting on maize yield, providing a scientific basis for high-yield maize cultivation. Method: The experiment was conducted at the Inner Mongolia Agricultural University farm, using silage maize cultivar Wenyu No. 3 as the research object. Three irrigation modes were set up: furrow irrigation mode (KG), above ground drip irrigation mode (GD), and flat drip irrigation mode (PD). The effects of these three irrigation modes on maize root growth, photosynthetic capacity, and yield were studied by regulating soil temperature. Result: Compared to PD, KG increased maize root dry weight by 31.25%. During the jointing stage, the photosynthetic capacity of maize under KG was 9.59% and 12.87% higher than under GD and PD, respectively. KG achieved the highest yield, with increases of 11.07% and 27.42% over GD and PD, respectively. Conclusion: Under equal irrigation conditions, the furrow irrigation mode (KG) increases root dry weight by affecting soil moisture and temperature, indirectly enhancing leaf photosynthetic capacity and increasing single plant grain yield. Furrow irrigation is a sustainable planting strategy that can achieve increased maize yield.

Key words: Maize; Irrigation mode; Increase yield; Wide-narrow row

玉米(*Zea mays* L.)是世界上重要的粮食作物之一, 也是我国第一大粮食作物, 年产量约占全球玉米产量的23%, 2021年我国玉米进口量达到2 835万t的历史峰值^[1], 其高产稳产不仅关乎农

民经济收益, 更对国家粮食安全战略具有重要意义。在耕地资源有限的条件下, 提高玉米单产是实现增产的关键。内蒙古大部分地区属于半干旱大陆性季风气候, 其中呼和浩特地处内蒙古西部, 较为干旱, 节水栽培是一项非常重要的研究内容。因此探索一种高效的灌溉模式, 对实现玉米高产具有重要意义。不同的灌溉方式从多种角度影响着土壤和作物生长, 水分是决定玉米产量最活跃的因素, 适宜的土壤水分含量才能促进其他因素发挥最大作用, 从而提高产量^[2]。与畦灌

收稿日期: 2024-06-22

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2023MS03022)

作者简介: 王京辉(1996-), 女, 在读硕士, 从事玉米-微生物互作研究。

通信作者: 韩升才, 男, 博士, 副教授, E-mail: shengcai@imau.edu.cn

和沟灌相比,滴灌对于玉米产量提高影响不显著,但节水效果明显。不同的灌溉模式很大程度上影响着土壤的含水量以及作物的生长,合理的灌溉方式显得尤其重要^[9]。呼和浩特是内蒙古玉米主产区之一,该地区有超过50%的农业用地种植玉米。

目前对玉米高产的研究主要集中在新品种的培育、提高种植密度等方面,在现有种质资源条件下,通过精准调控水肥管理,已成为挖掘玉米单产潜力的重要研究方向。因此,需要探索适合玉米高产的灌溉模式,为内蒙古呼和浩特地区玉米种植提供参考。本研究设置开沟灌水模式、开沟地上滴灌模式、平地滴灌模式,探究不同灌溉模式对玉米产量的影响,寻求适合玉米高产的灌

溉措施,提供有关沟灌高产的理论依据。玉米苗期开沟提高地温,拔节期沟内集中浇水,促进根系发育,同时根据玉米养分需求规律采用八段式施肥满足作物不同时期的营养需要。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古农业大学农场(40°41' N, 111°22' E),海拔高度1 063 m,属于温带大陆性气候,降雨主要集中在7-9月,年均降雨量约400 mm,年均气温7.2℃,无霜期133 d,年平均日照时数2 952.1 h。犁底层较厚且坚硬,犁底层紧实度为1 743 kPa。土壤类型为沙壤土。试验地土壤理化性质见表1。

表1 土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties

年份	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	有效氮 /g·kg ⁻¹	速效磷 /g·kg ⁻¹	速效钾 /g·kg ⁻¹
2023	7.80	15.06	0.29	0.51	0.89

1.2 供试材料

供试玉米品种为青贮玉米文玉3号,北京佰清源畜牧业科技发展有限公司提供。发酵羊粪作为底肥,用量562 kg/hm²,呼伦贝尔绿冠羊粪土发酵基地提供。磷酸氢二铵(N:11%,P₂O₅:52%)用量120 kg/hm²,黑龙江北大荒农业股份有限公司生产。尿素(N:46%)用量345 kg/hm²,甘肃刘化(集团)有限责任公司生产。硫酸钾(K₂O:50%)用量390 kg/hm²,阿康国际化工集团有限公司生产。

1.3 试验设计

试验于2023年5月7日播种,设置3个小区,

小区面积共198.4 m²(12.8 m×15.5 m),种植密度为83 340株/hm²,播种前一周将发酵羊粪作为底肥一次性施入,追施氮磷钾肥采用八段式施肥(施肥量详见表2),拔节期4次,抽雄期2次,乳熟期2次。设宽窄行种植模式,窄行行距45 cm,宽行行距110 cm,株距16 cm。播种后进行常规田间管理。各个试验单元均随机分布,小区两侧设置保护行。

试验设置3种灌溉模式:开沟灌水模式(KG)、开沟地上滴灌模式(GD)、平地滴灌模式(PD),各处理施肥量、施肥时间相同。开沟灌水

表2 施肥时间与施肥量
Table 2 Fertilization time and amount

kg/hm²

生育期	追肥时间/月·日	氮肥	磷肥	钾肥
拔节期	06.22	30	15	45
	06.27	30	15	45
	07.05	45	15	60
	07.10	60	15	75
抽雄期	07.17	60	15	75
	07.27	45	15	30
乳熟期	08.08	45	15	30
	08.18	30	15	30

模式(KG):玉米拔节时期(7月4日)在大行距间开沟,沟宽 15 cm,深 35 cm,开沟后沟内集中灌溉,灌溉量与其他处理一致。平地滴灌模式(PD):双行铺设滴灌带。开沟地上滴灌模式(GD):大行距间开沟不灌水,双行铺设滴灌带。

1.4 测定指标与方法

拔节期、吐丝期和灌浆期在每个小区取 5 株长势一致的玉米,测定其株高、茎粗、叶面积等形态指标。株高以自然状态下顶端最高处距地面的高度表示,用游标卡尺测量茎基部直径,采用长 $\times$ 宽 $\times 0.75$ 计算叶面积^[4]。在拔节期每个处理连续选取 10 株,分别切割成长段,装入牛皮纸袋在烘箱内 105℃杀青 30 min,在 45℃下烘干至恒重,测定植株干重。在成熟期每个处理连续选取 10 株,测定籽粒干重和植株干重(包括茎秆、叶、穗轴)。根系取样,于拔节期各处理选取 3 株长势一致植株采用挖掘法将根系(以玉米为中心,挖掘土壤体积为 16 cm $\times$ 45 cm $\times$ 20 cm)挖出,洗净后剔除杂质,捞出死根,105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重,测定根干重。

成熟期每处理选取 40 株长势一致的玉米进行测产,称重、测定水分含量,折算成标准含水量(14%)的产量,并调查穗行数和行粒数。

土壤温度用电子温湿度记录仪自动记录试验田 10 cm 土层的温度。

SPAD 值测定:拔节期,每处理选取具有代表性的 15 株幼苗,利用 SPAD-502 叶绿素仪测定玉米叶

片的叶绿素含量,每个叶片选择上、中、下 3 个部位进行测量,取平均值作为该处理的 SPAD 值。

土壤紧实度利用紧实度仪(SC900)测定。

灌溉水分利用效率(IWUE)计算公式为:

$$IWUE=Y/I$$

式中: IWUE 为灌溉水分利用效率; Y 为玉米的产量; I 为生育期灌水量,生育期灌水量为浇水量与降雨量之和。

1.5 数据分析

运用 Excel 2010 软件进行初步的数据整理分析,采用 SPSS 22.0 进行数据的统计分析,运用 GraphPad Prism 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米根际土壤温度的影响

由图 1 可知,3 种处理条件下 10 cm 深度处玉米根区土壤温度变化趋势基本一致,玉米出苗后,KG 处理、PD 处理和 GD 处理土壤最低温度均出现在 9 月 22 日,但最高温度出现时间不同,KG 处理最高温度出现在 7 月 13 日,PD 处理出现在 7 月 2 日,GD 处理出现在 6 月 16 日。温度是影响玉米生长及产量的主要因素^[5]。内蒙古地区玉米播期温度较低,而玉米萌发初期对温度敏感,低温会推迟种子萌发,降低发芽率,苗期低温影响玉米对水分和养分的吸收,造成生育期延缓。KG 处理前期升温快。PD 处理、GD 处理与 KG 处理土壤温差变化范围分别为 1.1~7.6℃、0.4~6.8℃、0.8~7.6℃。

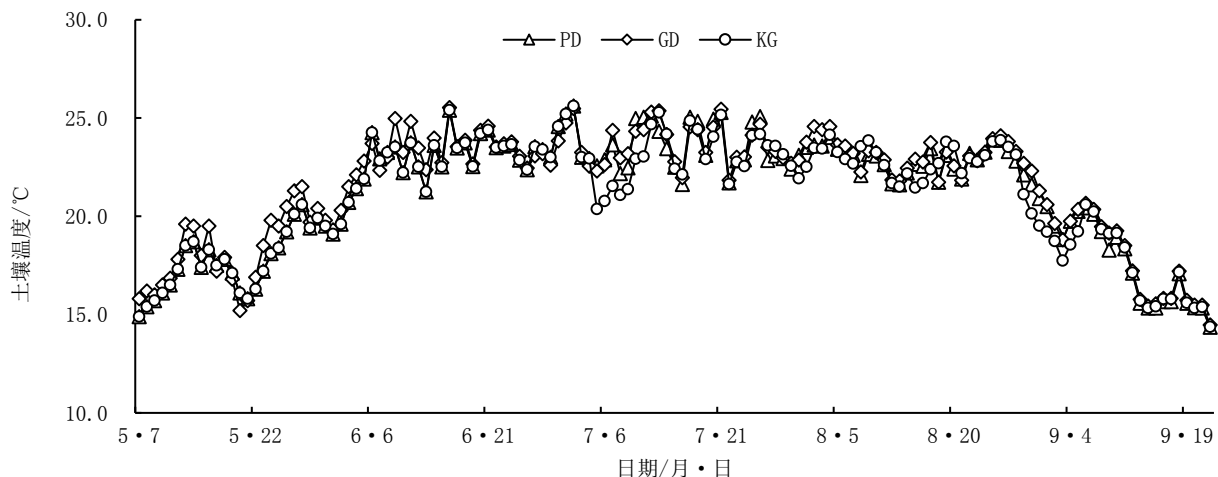


图 1 土壤温度变化图

Fig.1 Soil temperature variation graph

选取 6 月 25 日为代表,天气晴朗,检测土壤温度日变化(图 2)。地温日变化呈现了典型的昼夜波动规律,整体趋势与太阳辐射周期高度吻合,地温在夜间至清晨(00:00-06:00)持续下降,最低

温度出现在 06:00 前后(约 20.7℃),这与无太阳辐射时的地表热量散失有关。日出后(06:00-12:00),地温呈现快速上升趋势,每小时平均升幅达 0.5~1.0℃,正午(12:00)达到 27.8℃,午后(12:00-15:00)

升温速率减缓但仍维持高位,14:00–15:00出现全日峰值(29.1℃),体现了地表热量的累积效应。日落后(18:00后)地温开始持续下降。值得注意的是,在峰值时段(14:00–16:00)温度波动小于

0.2℃,在午夜(22:00–24:00)稳定在24.5℃左右。全天温度变幅达8.4℃,且白天温度梯度(10:00–14:00间4.3℃变化)明显陡于夜间(20:00–24:00间2.3℃变化)。

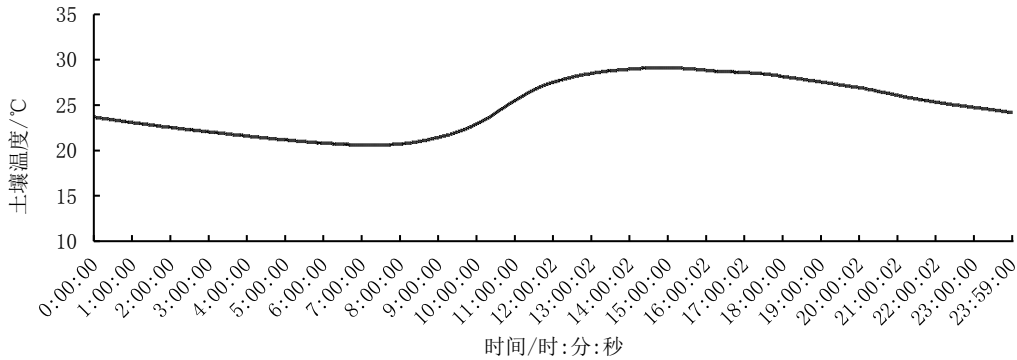


图2 土壤温度日变化图

Fig.2 Diurnal variation of ground temperature

2.2 不同灌溉模式对拔节期玉米根干重的影响

由表3可知,玉米拔节期不同处理根系干重表现为:KG>GD>PD,KG处理与PD处理、GD处理差异显著。0~20 cm土层根系干重KG处理最高,与PD处理、GD处理差异显著;20~40 cm土层根系干重KG处理最高,与PD处理、GD处理差异显

著。表明KG处理在促进根系发育方面具有显著优势。各处理玉米的根系93%~95%分布在0~20 cm土层,由于灌溉模式不同,KG处理20~40 cm根系分布比PD处理和GD处理分别增加66%与28%。综合而言,KG处理通过优化浅层和深层根系的协同生长,显著提高了根系总生物量。

表3 不同灌溉模式对拔节期玉米根干重的影响

Table 3 Effects of different irrigation modes on maize roots dry weight

处理	0~20 cm	20~40 cm	总和
PD	21.04±0.63c	1.03±0.06b	22.07±0.63b
GD	21.43±0.6b	1.34±0.23b	22.77±0.56b
KG	24.13±0.45a	1.72±0.07a	25.86±0.48a

注:小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ level, the same below.

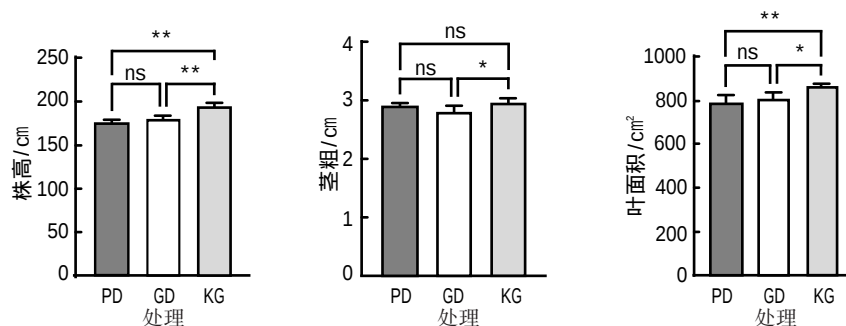
2.3 不同灌溉模式对玉米地上部生长指标的影响

不同灌溉模式对玉米拔节期、吐丝期和灌浆期的株高、茎粗、叶面积影响不同。由图3可知,拔节期,PD、GD、KG处理株高分别为176.64 cm、179.58 cm、193.84 cm,KG处理株高极显著高于PD处理、GD处理;茎粗分别为2.90 cm、2.79 cm、2.95 cm,KG处理茎粗显著大于GD处理。KG处理叶面积最大,为842.50 cm²,显著高于GD处理,极显著高于PD处理;PD处理和GD处理叶面积分别为785.04 cm²、862.90 cm²,两者之间差异不显著。

由图4可知,吐丝期,PD处理、GD处理、KG处理株高分别为253.13 cm、278.34 cm、299.82 cm,

PD处理与KG处理之间差异显著;茎粗在3个处理之间差异不显著。KG处理叶面积最大,为1 256.18 cm²,极显著高于PD处理,显著高于GD处理;PD处理和GD处理叶面积分别为1 027.49 cm²、1 093.65 cm²,两者之间差异不显著。

由图5可知,灌浆期,PD处理、GD处理、KG处理株高分别为264.58 cm、284.72 cm、314.08 cm,PD处理与KG处理之间差异显著;茎粗分别为2.82 cm、2.74 cm、2.87 cm,三者之间无显著性差异。KG处理叶面积最大,为1 449.64 cm²,极显著高于PD处理,显著高于GD处理;PD处理和GD处理叶面积分别为1 155.84 cm²、1 240.02 cm²,两者之间差异不显著。



注：“*”“**”分别表示差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$),“ns”表示差异不显著,下同。

Note: * and ** indicate significant difference at $P<0.05$ level $P<0.01$ level, ns means the difference is not significant, the same below.

图3 拔节期不同处理对玉米生长指标的影响

Fig.3 Effects of different treatments during the jointing stage on maize growth indicators

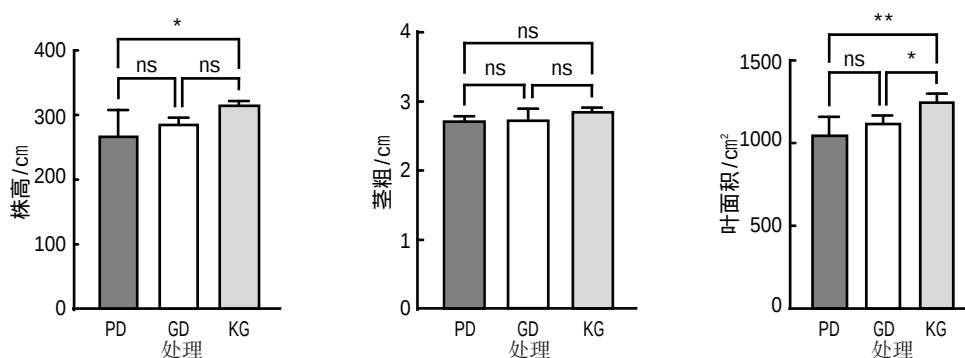


图4 吐丝期不同处理对玉米生长指标的影响

Fig.4 Effects of different treatments during the silking stage on maize growth indicators

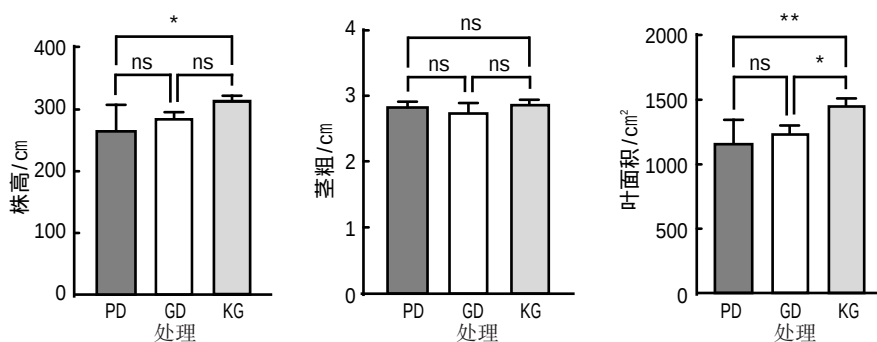


图5 灌浆期不同处理对玉米生长指标的影响

Fig.5 Effects of different treatments during the filling stage on maize growth indicators.

2.4 不同灌溉模式对玉米穗位叶SPAD值的影响

由表4可知,PD处理穗位叶平均SPAD值为59.70,KG处理穗位叶平均SPAD值为65.43,GD处理穗位叶平均SPAD值为60.81,GD处理与PD处理无显著性差异,KG处理与两者差异显著。

2.5 不同灌溉模式对玉米穗部特征、产量及其构成因素的影响

由表5可知,KG处理对玉米穗长、行粒数、穗粗、穗重、穗粒重的影响显著高于PD处理和GD处理。PD处理和GD处理各指标间差异均未达显

著水平。

由表6可知,KG处理鲜重、干重、籽粒产量均较高。KG处理干重比PD处理与GD处理分别高25.32%与29.04%,KG处理籽粒产量比PD处理与GD处理分别高11.08%与18.01%。

2.6 不同灌溉模式对灌溉水利用效率的影响

由表7可知,KG处理可显著提高玉米灌溉水利用效率,且KG处理显著高于PD处理和GD处理。KG处理与PD处理和GD处理相比,灌溉水利用效率分别提高11.07%和18.02%。

表4 不同处理 SPAD 值分析
Table 4 Analysis of SPAD values under different treatments

处理	SPAD 值
PD	59.70±3.90b
GD	60.81±4.49b
KG	65.43±5.06a

3 讨 论

水资源短缺已成为全球性问题,寻找有效利用淡水资源的农业措施已成为广泛讨论的话题^[6]。同时,气候变化对作物产量的负面影响日渐显著^[7],在此背景下,改进干旱和半干旱地区的传统灌溉技术显得尤为重要。本研究比较了开沟灌水模式(KG)、开沟地上滴灌模式(GD)、平地滴

表5 不同灌溉模式对玉米穗部特征的影响
Table 5 Effects of different irrigation modes on maize ear traits

处理	穗长/cm	穗行数	行粒数	穗粗/mm	轴粗/mm	穗重/g	穗粒重/g
PD	21.92±2.08b	14.1±1.52a	47.45±6.76b	46.36±2.53b	28.01±2.86a	235.07±46.30b	198.54±40.52b
GD	21.32±1.71b	14.3±1.34a	45.9±3.93b	46.74±1.83b	28.89±1.88a	219.01±16.59b	186.42±16.73b
KG	25.11±3.01a	14.2±1.82a	52.6±4.31a	48.93±3.18a	29.33±2.74a	291.87±52.58a	237.54±41.27a

表6 不同灌溉模式对玉米产量及其构成因素的影响
Table 6 Effects of different irrigation modes on yield and its components

处理	鲜重/t·hm ⁻²	干重/t·hm ⁻²	籽粒产量/t·hm ⁻²	穗粒数	穗数/万穗·h m ⁻²	百粒重/g
PD	76.01±10.85b	26.38±4.92b	16.34±0.65b	666.4±105.04b	7.8±0.1a	31.28±2.46b
GD	79.88±3.70b	25.62±1.17b	15.38±0.19b	654.1±61.77b	7.5±0.1b	31.39±2.42b
KG	93.51±9.38a	33.06±1.89a	18.15±1.27a	744.8±96.47a	7.8±0.1a	36.79±3.22a

表7 不同灌溉模式对灌溉水利用效率的影响
Table 7 Effects of different irrigation modes on irrigation water use efficiency

处理	籽粒产量/t·hm ⁻²	灌水总量/mm	灌溉水利用效率/kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹
PD	16.34±0.65b	376	43.46b
GD	15.38±0.19b	376	40.90b
KG	18.15±1.27a	376	48.27a

灌模式(PD)对玉米产量的影响,结果表明,开沟灌水模式(KG)综合表现最优,玉米鲜重达到93.51 t/hm²,籽粒产量达到18.15 t/hm²。

研究表明,适宜的土壤温度不仅有利于春玉米生长前期种子发芽、出苗和幼苗的生长,还对后期产量形成有重要影响^[8-10]。然而,通过主动调节土壤温度来提高玉米产量的田间实践研究仍较为有限。乐章燕等^[11]的研究表明,玉米根系生长最适温度范围为20~24℃,超出此范围会导致主侧根变小变细,当土壤温度超过35℃时,根系生长速率显著降低;当土壤温度低于4.5℃时,根系生长则完全停滞。此外,土壤温度的变化还会影响地下微

生物群落结构及其活性,土壤温度升高,微生物生物量和碳水化合物含量上升,新根中的糖含量也增加^[12]。本研究中,KG处理的土壤温度变化范围为7.6~1.1℃,PD处理为6.8~0.4℃,这一差异表明KG处理具有调节土壤温度的作用,特别是在不具备滴灌条件的地区,是一种有效的灌溉模式。但是,关于不同灌溉模式下土壤温度动态变化及其对作物生长影响的机制仍需进一步深入研究。

水分和养分对玉米根系的发育起着至关重要的作用。优化玉米根系周围水分含量可以提高对土壤资源的获取效率,有助于实现高产^[13]。本研究中,KG处理显著促进了玉米根系的形成,使其

能够更好地响应生长过程中营养物质的变化。根系通过调节玉米对养分的吸收和水分利用效率,影响地上部与地下部生物量的生产与分配,进而影响籽粒产量^[14],这一结论与本试验结果一致,进一步验证了KG处理的有效性。本研究结果表明,开沟灌水模式能够显著提升玉米的叶面积、株高及根干重,这可能是开沟灌水模式改善了土壤中水分、养分和空气的流通条件,促进了根系的发育,使玉米根系向土壤下层(20~40 cm)延伸。因此,玉米能够更充分地利用灌溉水肥,促进地上部生长,增加光合面积,并加速光合产物向籽粒的运输。罗宏海等^[15]研究发现,充足的土壤水分能够增强作物深层根系的吸水能力,有利于地上部的生长。灌溉方式和灌溉水平对玉米干物质积累、养分吸收、产量形成具有显著影响^[16]。本研究中,KG处理通过水分集中灌溉使水分渗透至土壤深层,减少水分流失、蒸发,提高了灌溉水利用效率。开沟灌水使土壤深层根系发达,能利用到土壤深层水分。开沟灌水模式提高土壤的透气性,有利于根系呼吸,进一步促进了根系的生长发育。开沟灌溉模式结合八段式施肥^[17-18],肥料随水施入,水肥协同。在拔节期,玉米干物质积累量随灌溉模式的改变呈现出显著差异。本试验结果与李英^[19]、杜文勇^[19]等研究结果不同,本研究中开沟灌水模式下干物质积累效果最好。作物90%以上的干物质源于光合作用,不同的灌溉方式对于玉米光合作用影响较大,其直接关系到玉米营养器官和生殖器官的形成和养分分配^[20]。水资源短缺和不断上升的灌溉成本引起了对提高水分利用效率的关注^[21],滴灌是常见的节水灌溉方式,但滴灌条件下会使根系在水肥集中地方分布密集,这就把根系限制在土壤表层^[22],Wu等^[23]研究发现,0~20 cm土层根长密度与玉米产量呈极显著正相关。本研究使用八段式施肥与开沟灌水相结合,使根系吸收水肥效率最大化,同时使玉米拔节吐丝期维持较高的光合能力来增加地上部干物质的积累。许多研究也表明,不同耕作方式会改善根系构型^[24],不同灌溉方式施肥方式会影响不同器官生长发育和干物质的积累与形成,进而影响作物的水肥利用效率^[25-26]。

农田土壤水分的运移受到降雨、栽培模式、施肥方式等多种因素的影响。本研究基于当地传统栽培模式,结合上述因素形成了改进的开沟灌水模式(KG),KG处理下玉米的灌溉水分利用效率提高。有研究认为玉米耗水量和耗水深度随产量提高而增加^[27]。Cheysari等^[28]研究指出,灌溉深度影响

玉米根部的发育。本研究通过控制沟内灌水时间与灌水量满足玉米需水要求,提高灌溉水利用效率。

4 结 论

通过开沟灌水调节作物地上和地下部分的发育是玉米产量和资源利用效率协同提高的关键。本研究结果表明,开沟灌水模式(KG)通过影响土壤温度、提高根干重,从而提高叶片光合能力,促进根系发育,提高玉米产量。

参考文献:

- [1] LUO N, MENG Q F, FENG P Y, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2637.
- [2] 唐光木,何红,杨金钰,等.灌溉定额对膜下滴灌玉米生理性状及产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 293-297.
TANG G M, HE H, YANG J Y, et al. Effect of irrigation quota on physiological characteristic and yield in drip irrigation under mulch of maize[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 293-297. (in Chinese)
- [3] LI C, WANG Q, LUO S, et al. Reducing water and nitrogen inputs combined with plastic mulched ridge-furrow irrigation improves soil water and salt status in arid saline areas, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(8): 761-776.
- [4] 陈小娟,杨依彬,龚林,等.三种不同聚合度组成的聚磷酸铵对玉米苗期生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 337-342.
CHEN X J, YANG Y B, GONG L, et al. Effect of ammonium polyphosphates with various degree of polymerization on growth of maize seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(2): 337-342. (in Chinese)
- [5] 郑洪建,董树亭,王空军,等.生态因素对玉米品种产量影响及调控的研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 862-868.
ZHENG H J, DONG S T, WANG K J, et al. Effects of ecological factors on maize (*Zea mays* L.) yield of different varieties and corresponding regulative measure[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 862-868. (in Chinese)
- [6] SARKAR S, BISWAS M, GOSWAMI S B, et al. Yield and water use efficiency of cauliflower under varying irrigation frequencies and water application methods in Lower Gangetic Plain of India [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1655-1662.
- [7] LACHAUD M A, BRAVOURETA B E, LUDENA C E. Economic effects of climate change on agricultural production and productivity in Latin America and the Caribbean (LAC)[J]. *Agricultural Economics*, 2021, 53(2): 321-332.
- [8] 王洪预,吕小飞,李文莹,等.基于大田土壤温度和水分变化的吉林省春玉米播期研究[J]. *东北农业科学*, 2021, 46(1): 1-5.
WANG H Y, LYU X F, LI W Y, et al. Sowing dates of spring maize in Jilin based on temperature and moisture of soil charac-

- ters[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(1): 1-5. (in Chinese)
- [9] 汤晋,李文,陈洋庚,等.气候变化影响了江西省主要农作物产量吗?—基于江西省30年省级数据的实证[J].东北农业科学,2021,46(6):103-108.
- TANG J, LI W, CHENG Y G, et al. Does climate change affect the production of major crops in Jiangxi Province? — An empirical study on 30 years of provincial data in Jiangxi Province [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(6): 103-108. (in Chinese)
- [10] 孙仕军,许志浩,张旭东,等.地膜覆盖对玉米田间土壤含水率和地温变化的影响[J].玉米科学,2015,23(3):91-98.
- SUN S J, XU Z H, ZHANG X D, et al. Effect of film mulching on soil moisture and soil temperature in eastern Inner Mongolia rain-fed black soil area[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(3): 91-98. (in Chinese)
- [11] 乐章燕,刘晶淼,廖荣伟,等.土壤温湿度对玉米根系的影响[J].玉米科学,2013,21(6):68-72.
- LE Z Y, LI J M, LIAO R W, et al. Effect of soil temperature and humidity on different developmental periods of corn root[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(6): 68-72. (in Chinese)
- [12] TIMO D, FINÉR LEENA, TARJA L. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season[J]. Tree Physiology, 2001(7): 465-472.
- [13] WANG D, GAO Y, LI M, et al. Change in hydraulic properties of the rhizosphere of maize under different abiotic stresses[J]. Plant and Soil, 2020, 452(1-2): 615-626.
- [14] QI D, HU T, SONG X, et al. Effect of nitrogen supply method on root growth and grain yield of maize under alternate partial root-zone irrigation[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):1-10.
- [15] 罗宏海,张宏芝,张亚黎,等.干旱区膜下滴灌条件下土壤深层水对棉花根系生长、分布及产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):395-402.
- LUO H H, ZHANG H Z, ZHANG Y L, et al. Effects of water storage in deeper soil layers on the root growth, root distribution and economic yield of cotton in arid area with drip irrigation under mulch[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 395-402. (in Chinese)
- [16] JOHNSON M J, BECKER M, KABORÉ P E J, et al. Alternate wetting and drying: a water-saving technology for sustainable rice production in Burkina Faso? [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2024, 129(1): 93-111.
- [17] 毛圆圆,薛军,翟娟,等.水肥一体化条件下密植高产玉米适宜追氮次数研究[J].植物营养与肥料学报,2022,28(12): 2227-2238.
- MAO Y Y, XUE J, ZHAI J, et al. Optimum times of nitrogen topdressing in high-yield maize under high plant density and fertigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(12):2227-2238. (in Chinese)
- [18] LI S X, WANG Z H, MALHI S S, et al. Chapter 7 nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102(9): 223-265. (in Chinese)
- [19] 李英,马兴祥,王鹤龄,等.不同灌溉方式对玉米生物量的影响[J].安徽农业科学,2014,42(1):64-66.
- LI Y, MA X X, WANG H L, et al. Effects of different irrigation patterns on biomass components of maize (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(1): 64-66. (in Chinese)
- [20] 杜文勇,何雄奎,胡振方,等.不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J].排灌机械工程学报,2011,29(2):170-174.
- DU W Y, HE X K, HU Z F, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170-174. (in Chinese)
- [21] MATTIUZI P D C, MARQUES F G, MEDELLÍN-AZUARA J. Reassessing Water Allocation Strategies and Conjunctive Use to Reduce Water Scarcity and Scarcity Costs for Irrigated Agriculture in Southern Brazil[J]. Water, 2019, 11(6): 1140.
- [22] KOECH, LANGAT P. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context[J]. Water, 2018, 10(12): 1771.
- [23] WU Y, BIAN S F, LIU Z M, et al. Drip irrigation incorporating water conservation measures: effects on soil water-nitrogen utilization, root traits and grain production of spring maize in semi-arid areas[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(12): 3127-3142.
- [24] 陈静,马钦,崔文芳,等.氮高效玉米根系构型及吸收特性的研究进展[J].东北农业科学,2022,47(3):55-58.
- CHEN J, MA Q, CUI W F, et al. Research progress on root structure and absorption characteristics of nitrogen efficient maize[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(3): 55-58. (in Chinese)
- [25] SIDDIQUE K H M, BELFORD R K, TENNANT D. Root: shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment[J]. Plant and Soil, 1990, 121(1): 89-98.
- [26] TARDIEU F, DAVIES W J. Integration of hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants[J]. Plant, Cell and Environment, 2010, 16(4): 341-349.
- [27] 王学春,李军,胡伟,等.黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米产量与土壤干燥化效应模拟[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):1-11.
- WANG X C, LI J, HU W, et al. Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different level fertilization treatments in Jinzhong semiarid areas of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 1-11. (in Chinese)
- [28] GHEYSAARI M, SADEGHI S, LOESCHER W H, et al. Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize[J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 126-138.

(责任编辑:范杰英)